



希土類永久磁石による機械振動の吸振機構に関する研究

著者	小島 宏行
号	569
発行年	1981
URL	http://hdl.handle.net/10097/11518

氏 名	こ じま ひろ ゆき 小 島 宏 行
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 56 年 10 月 14 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 42 年 3 月 岩手大学工学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	希土類永久磁石による機械振動の吸振機構に関する 研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 斎藤 秀雄 東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 渥美 光 東北大学教授 八巻 昇 東北大学教授 穴山 武

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

機械振動の防止もしくは緩和のために弾性支持や動吸振器など諸種の吸振機構が用いられており、古来多くの研究がなされている。一方、近年開発され実用化されるに至ったサマリウム系希土類永久磁石は、従来の高性能永久磁石をはるかに凌駕する優れた最大エネルギー積と保持力を持つ超高性能永久磁石で、その反発力と渦電流制振力は磁気ばねおよび磁気ダンパとして効果的に作動する。このような磁気ばねと磁気ダンパは、無接触で作用し温度特性も良好であること、従来の磁石よりも格段に大きな値の磁気力が得られることなどの特長を有している。磁気力を応用した機械振動の吸振に関する研究はこれまでも行われているが、希土類磁石の実用化に伴いより多くの研究者の関心を集めている。磁気ばねによる磁気動吸振器に関していくつかの研究がなされているが、反発力の解析は行われていず、その非線形振動挙動も十分には調べられていないようである。また航空機の胴体部の振動防止装置、トルク計、人工衛星の転頭運動の防止装置および定数可変形動吸振器等の減衰力要素として磁気ダンパが応用されており、その減衰力特性が解析されている。しかしながら、これらの研究では導体の面積を無限に大きいものとしてあり、実用上重要な矩形磁束と矩形導体を組合せた場合や永久磁石による場合を取り扱ったものは見当

らないようである。さらに振動変位を検出し、これを電力増幅し電磁力として被吸振体にフィードバックする形式の電磁吸振機構についての研究もなされているが、希土類磁石を応用すれば、高性能化および小型化が可能となるであろう。

これらのことから本研究では、まず円筒形希土類磁石による磁気ばねの特性を解明し、矩形磁束と矩形導体とからなる磁気ダンパならびに円筒形希土類磁石と筒状あるいは板状導体とからなる磁気ダンパの減衰力特性を明らかにする。つぎに磁気力を有する1自由度振動系ならびに磁気動吸振器系の振動特性を究明し、さらに希土類磁石と板状コイルとからなる電磁吸振機構の吸振特性を明らかにしている。

第2章 円筒形希土類磁石による磁気ばねの特性

本章では、円筒形希土類磁石の同種磁極間に働く反発力のばね作用を、解析的にかつ実験的に調べた。まず希土類磁石の保持力が極めて大きいことから、磁化の強さを一定とみなして、磁束密度ならびに磁界分布の理論式を求めた。磁束密度を測定するとともに、磁粉法によって磁界分布を実測し、これらを数値計算結果と比較した。つぎにマックスウェルの応力テンソルおよびローレンツ力を用いて、反発力の理論式を導くとともに、実験結果と数値計算結果を照合した。両者は良く一致し、理論式の妥当性が確認できた。さらに数値計算を行い、磁石の形状が反発力に及ぼす影響を調べた。適当な振動振幅範囲内では、反発力は磁石中心間距離の逆 n 乗に比例するものとみなすことができる。磁石縦断面のアスペクト比 m および内外径比 σ の値を $m \cong 1$, $\sigma \leq 0.3$ となるように定めれば、効果的な磁気ばね特性が得られることが明らかになった。

第3章 矩形磁束と矩形導体とからなる磁気ダンパ

本章では、矩形磁束と矩形導体とからなる磁気ダンパの減衰力特性を、ポテンシャルで表示した微分方程式を用いて解析するとともに、シンプレックス法によって数値解析的に導体の最適形状を明らかにした。まずポテンシャルを2重フーリエ級数に展開して微分方程式の解を求め、これから渦電流を与える式を導いた。つぎに渦電流に作用するローレンツ力を磁束の作用している領域で積分することにより減衰力の厳密な式を導いた。本章で得られた減衰力は、導体と磁束との面積比の増加に伴い、導体を無限に広いものとした既報の結果に近づき、解析式の妥当性が確かめられた。また減衰力が最大となる導体の最適形状が存在する。この最適形状は磁束のそれよりも運動方向により長く、その傾向は導体と磁束との面積比の小さいほどより顕著になることが明らかになった。さらに磁気ダンパを動吸振器の減衰力要素として用いた場合について考察し、本章で導いた理論式の有用性を調べた。

第4章 円筒形希土類磁石と筒状あるいは板状導体とからなる磁気ダンパ

この章では、軸対称磁場を有する円筒形希土類磁石に筒状あるいは板状導体を組合せた磁気ダンパの基本特性を解析し、数値計算結果を実験結果と比較した。まず筒状導体の場合は、導体を微小な環状部分に分割し、これに作用するローレンツ力を導体の断面について積分することによ

り減衰力を求めた。他方、板状導体の場合には軸対称磁束を微小筒状磁束に分割し、円柱状磁束によるものに帰着させて減衰力の理論式を導いた。また磁気ダンパを持つ1自由度振動系の減衰自由振動波形を実測し、その対数減衰率から減衰係数を求めた。実測された波形から、本章での磁気ダンパの減衰力は正確な速度比例形であることが実証された。実験結果と数値計算結果は良好に一致した。数値計算を行い、磁石の形状が減衰力特性に及ぼす影響を調べた。一定磁石体積のもとで減衰力の値を最大にならしめるためには、磁石内外径比 σ の値が $\sigma \leq 0.25$ の場合、磁石縦断面のアスペクト比をほぼ1に設計することが望ましい。

第5章 磁気力を復元力とする1自由度振動系の強制振動

この章では、第2章で述べた円筒形希土類磁石による磁気ばねを持つ縦型非線形1自由度系の強制振動応答を、基本調波および1/2次、1/3次分数調波振動について調べ、実験結果と数値計算結果を対照した。この系の復元力は、反発力を静つり合い位置でティラー展開することにより得られる。定常振動解は、非線形運動方程式に調和バランス法を適用して、振動基線のずれを考慮した形で求め、さらに安定解析を行った。数値計算を行い、主質量の上下に取り付けられている磁気ばねの中心間距離の和と減衰力とを変化させた場合、共振曲線がどのように変動するかを明らかにした。実験においては、主質量の下側にだけ磁気ばねを取り付け、変位で加振した。なお第4章で述べた板状導体と円筒形希土類磁石とからなる磁気ダンパを減衰力要素として用い、連続撮影カメラによって振動変位を検出した。磁気減衰を作用させない場合には、1/2次および1/3次分数調波振動が発生したが、磁気減衰を強めると、これらの振動は消滅した。実験結果と数値計算結果は良好な一致を見せた。

第6章 磁気動吸振器を有する振動系の動特性

本章では、3個の円筒形希土類磁石と筒状導体を組み合わせた磁気動吸振器の強制振動特性を解析的に調べるとともに、連続系シミュレーション言語によるシミュレーション結果と数値計算結果を照合した。はじめに定常振動解を調和バランス法を用いて求めた。この定常解を時間の関数とみなし、その微小なずれ量についての微分方程式を導き、得られた特性方程式にラウス・フルビッツの判別式を適用することによって、定常振動解の安定判別を行った。つぎに数値計算を行い、固定磁石間距離や吸振器減衰などの因子が変化した場合、強制振動応答がどのように変動するかを調べた。可動磁石の上下に反発力が作用する場合の共振曲線は、顕著な硬化ばね特性を示すが、片面にだけ作用する場合は、振幅の小さい範囲で軟化ばね特性を示し、振幅の増加に伴い硬化ばね特性に移行することが明らかになった。主系および吸振器の減衰が極めて小さく、かつ加振力が比較的大きい場合には、振幅変調された概周期振動が発生する。数値計算結果とシミュレーション結果は良く一致し、本章で導いた理論式の妥当性が確認された。

第7章 磁気動吸振器の最適設計

前章では磁気動吸振器の動特性について調べた。本章においては、まず非線形計画法の一手法

であるシンプレックス法を用いて、磁気動吸振器の最適調整条件を明らかにする。そして非対称非線形復元力を等価線形ばね定数で置き換える手法によって最適調整の近似式を導くとともに、この式の有効性を吟味し、最適調整条件に対する定性的な考察を加えた。加振力が強くなると、最適固定磁石間距離は大となり、吸振器の最適減衰比も増加することが明らかになった。つぎにセンサコイル、ダンピングコイルおよび電力増幅器とからなる可変減衰機構を吸振器に取り付け、吸振器減衰量と固定磁石間距離を種々の値に変化させ実験を行った。この可変減衰機構を取り付けた磁気動吸振器は、ばね定数と減衰量とをそれぞれ任意の値に調整できるので、最適調整が容易に行える。また固定磁石間距離が最適値でない場合、吸振器の固有振動数に対応する共振は、非線形性が顕著であるが、適当な減衰を与えれば消失し、反面、主系の固有振動数に対応する共振は大きくなることが明らかになった。なお筒状導体を用いた場合の実験結果についても述べた。

第 8 章 板状コイルと希土類磁石とからなる電磁吸振機構

本章では、短円柱型希土類磁石とホール素子の組合せを用いて無接触で検出した振動信号に、適当な演算を施した後これを増幅して、振動体に取り付けた板状コイル型電磁駆動機構に印加する方式の電磁吸振機構について述べた。ホール素子の出力は振動変位の逆 n 乗に比例するので、対数アンプと逆対数アンプを用いて線形化回路を試作した。板状コイル型電磁駆動機構は、継鉄によって保持されている 2 個の円筒形希土類磁石間に板状コイルを挿入した形式になっている。演算回路に応じて種々の減衰力が得られるが、ここで用いたものは、振動変位積分型減衰力、変位比例型逆加振力、クーロン摩擦型矩形波減衰力および振幅比例型矩形波減衰力の 4 種である。強制振動実験においては、板状コイルを固定し、永久磁石と継鉄の組合せを主質量とみなした自由度 1 の系を変位で励振するようにした。実験結果は、それぞれの演算回路に応じた吸振効果を示した。

第 9 章 結 論

本論文を要約し、結果をとりまとめたものである。

終りに、本研究に際し終始御懇篤な御指導と御鞭撻を賜りました東北大学教授斎藤秀雄先生、有益な御助言を賜りました東北大学教授渥美光先生、阿部博之先生、穴山武先生、八巻昇先生に深く感謝申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり終始御懇切な御指導と御激励を戴きました群馬大学名誉教授山川出雲先生、同教授長屋幸助先生、同助教授武田定彦先生に厚く御礼申し上げます。

審 査 結 果 の 要 旨

最近開発された希土類磁石は従来のアルニコ、フェライト磁石に比べ、逆磁界に対して極めて安定で、格段に強力な反発力を有している。この種磁石を用いた磁気吸振器は機械的吸振器に比べて多くの利点を有し、近年特に注目を集めているが、磁石間反発力は非対称非線形性を有し、その解析的取り扱い極めて複雑となるため、系統的な研究はほとんどなく、未知の事項が多い。著者はこれらに関する基礎的問題として、希土類磁石の磁気ばね特性、希土類磁石と筒状あるいは板状導体からなる磁気ダンパの減衰力特性を明らかにし、さらに進んで、これらばね、ダンパを組み込んだ機械振動系の振動応答を詳細に解明した。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編9章よりなる。

第1章は序論であり、従来の研究、本研究の目的および内容を説明している。

第2章では二個の円筒形希土類磁石を同一軸に配置した磁気ばねモデルについて、磁束密度と磁界分布を理論的に計算し、磁石間反発力は磁石間間隔の単項べき関数で表されることを明らかにしている。さらに実測値とも比較し、両者がよく一致することを確認、本解法の妥当性を明確にしている。

第3章および第4章では矩形磁石と板状導体および円筒形磁石と板状または筒状導体とからなる磁気ダンパについて、両者の相対運動によって生ずる渦電流減衰力を、磁石および導体のアスペクト比、磁極面と導体間のすき間および相対速度の関数として理論的に厳密に求め、実験値とも対比している。この種ダンパの設計上極めて有用な資料を提供したものと評価される。

第5章では磁気力を復原力とする1自由度振動系の変位励振振動を取り扱い、系に生ずる基本調波、 $1/2$ および $1/3$ 次分数調波振動を究明している。

第6章では希土類磁石と筒状導体とよりなる磁気動吸振器を主系に取り付けた2自由度振動系の力励振振動について、系の動特性を理論的に解明し、二種類の不安定解が存在することを明らかにし、デジタルシミュレーションによっても検証している。これらは興味ある知見である。

第7章では磁気動吸振器の最適調整値を非線形計画法の一手法であるシンプレックス法を用いて探索している。さらに磁気ばねの非対称非線形復原力を、等価線形復原力におきかえて最適値を求める実用的近似解法を提案し、シンプレックス法による結果と照合して、その有用性を確かめている。これらは貴重な成果である。

第8章では希土類磁石、ホール素子、板状コイルと適当な演算増幅回路の組み合わせにより、各種形状減衰力を発生する機械振動吸振装置を考案し、本装置を用いた機械振動系の振動応答と吸振効果を明らかにしている。

第9章は結論である。

以上要するに、本論文は機械振動の吸振機構に希土類磁石を導入し、その吸振特性を詳細に解明すると共に、磁気吸振器の設計について、多くの新しい知見を与えたもので、振動工学並びに機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。